

Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Bases teóricas

Experimental study of the effect of temperature on the strength of ready-mixed concrete. Theory

J. A. Ortiz Lozano^(*), A. Aguado de Cea^(**), L. Agulló Fité^(**), T. García Vicente^(**) y M. E. Zermeño de León^(*)

Recepción/Received: 30-I-07
Aceptación/Accepted: 1-VIII-07
Publicado online/Online publishing: 28-V-08

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio sobre los efectos de la temperatura ambiental sobre las prestaciones del hormigón, en estado fresco y endurecido, y sobre las propiedades de los materiales constituyentes del mismo, desde una perspectiva industrial. El objetivo principal es el de optimizar la dosificación del hormigón en climas cálidos y al mismo tiempo, establecer medidas de actuación a nivel industrial para minimizar los efectos adversos en plantas de producción de hormigón preparado. En la primera parte del artículo, se muestran los resultados de varias campañas experimentales cuyo propósito ha sido determinar la influencia de las temperaturas ambientales extremas sobre las propiedades térmicas, de trabajabilidad y mecánicas del hormigón, así como de morteros, pastas de cemento y áridos. Las conclusiones apuntan al árido como un factor de gran importancia, no sólo por las características específicas de su comportamiento con la temperatura, sino también, porque es el componente presente en mayor contenido en el hormigón. En la segunda parte del artículo, se presentan las bases de una formulación metodológica para llevar a cabo la optimización del hormigón en climas cálidos.

Palabras clave: hormigón, áridos, temperatura, resistencia a la compresión, trabajabilidad.

SUMMARY

The present article discusses the effects of temperature on the performance of both fresh and hardened concrete and on the properties of its constituent materials, from an industrial perspective. The primary aim of the study was to optimize concrete in very warm environments. Certain industrial procedures are proposed to minimize the adverse effects of climate on ready-mixed concrete performance. A number of experiments were conducted to determine the effect of extreme temperatures on the thermal behaviour, workability and mechanical properties of concrete, cement mortars, cement pastes, and aggregates. The results showed that aggregates, the predominant component of concrete, are especially temperature-labile. Basic measures for optimizing concrete performance in very warm weather were also developed. This procedure was successfully applied on an industrial scale in ready-mixed concrete production plants, where it yielded significant savings in summertime cement consumption.

Keywords: concrete, aggregates, temperature, compressive strength, workability.

^(*) Universidad Autónoma de Aguascalientes, (Aguascalientes, México).

^(**) Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España).

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos que los factores climatológicos causan sobre las propiedades del hormigón, son adversos y afectan tanto a los productores como a los usuarios finales. Las prestaciones afectadas, especialmente durante los meses de verano, son principalmente la trabajabilidad y la resistencia a compresión (1), representando una disminución de las mismas. La causa principal de esta disminución no suelen ser debidas a modificaciones en la calidad del cemento, ni de los áridos, ni de cualquier otro constituyente presente en el hormigón (1-3).

Por otro lado, la temperatura juega un papel muy importante en la trabajabilidad del hormigón, siendo conocido que bajo condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada consistencia o asentamiento (4,5). El efecto de la temperatura en la demanda de agua es principalmente producido por su influencia en la velocidad de la hidratación del cemento y en la tasa de evaporación del agua (6).

Asimismo, la trabajabilidad y la resistencia del hormigón están influenciadas por las propiedades de los áridos, las cuales son susceptibles de variaciones en función de la temperatura. En este sentido, la temperatura actúa sobre la velocidad de absorción y el rozamiento interno de los áridos, mientras que en el hormigón, tiene un efecto sobre su prestación y sobre su coste final (7-9).

A pesar de que dicho problema ha sido ampliamente estudiado y que es innegable su importancia, no son muchas las investigaciones conocidas que hayan tratado una posible solución simple desde el punto de vista industrial. La mayoría de los manuales de buena práctica, con planteamientos muy académicos, se limitan a recomendar algunas actuaciones sobre los constituyentes del hormigón reduciendo la temperatura de éstos o evitando que las elevadas temperaturas veraniegas incidan en cualquiera de las etapas de fabricación y puesta en obra del hormigón. Algunos ejemplos de estas prácticas pueden ser (10-16): minimizar el contenido de cemento por medio de aditivos químicos y adiciones minerales, utilizar cementos de bajo calor de hidratación, crear sombras en los acopios y rociarlos con agua fría, utilizar agua helada o incorporar escamas de hielo en el hormigón, enfriar el hormigón fresco con nitrógeno líquido, entre otros.

Sin embargo, estas actuaciones tienden a encarecer los costes de producción del hormigón, debido a que son poco prácticas o tienen una aplicación limitada, dependiendo del contexto de cada planta de producción de hormigón. Por otro lado, una solución muy habitual para hacer frente a este problema consiste en realizar un ajuste

1. INTRODUCTION

Weather can have adverse effects on concrete properties, to the detriment of both producers and end users. Workability and compressive strength are especially susceptible to summer heat (1). The decline in performance in these respects is not usually attributed to the deterioration of cement, aggregates or any other concrete constituent (1-3).

Temperature plays a critical role in concrete workability; indeed, more water is known to be required to obtain a certain consistency or slump in warm climates (4, 5). Temperature affects water demand primarily by accelerating both cement hydration and water evaporation (6).

Aggregate characteristics, which are temperature-sensitive, influence concrete workability and strength. By varying the absorption rate and internal friction of the aggregate, temperature compromises concrete performance and increases its cost (7-9).

Despite the severity of this widely studied problem, very few practical industrial solutions have been proposed in the literature. Most good practice manuals, which tend to be very academically oriented, merely recommend reducing the temperature of concrete components or avoiding concrete fabrication and casting when the outdoor temperature is high. The solutions proposed include: minimizing the cement content by using chemical and mineral admixtures, using low heat of hydration cements, storing materials in the shade and moistening them with cold water, and cooling the fresh concrete with liquid nitrogen (10-16).

Depending on the concrete plant, however, these methods may be impractical or only partially effective, thus increasing production costs. One common alternative is to alter the proportion of cement in concrete by overbatching cement and water while keeping the water-cement ratio constant. This technique is generally used in

te en el contenido de cemento del hormigón, sobredosificando cemento y agua manteniendo constante la relación agua/cemento. Por lo general, esta política se lleva a cabo desde principios de junio hasta mediados de septiembre, en algunos países avanzados con clima mediterráneo, por ejemplo, España. La misma se traduce en una sobredosificación de una cantidad fija de cemento sin ningún criterio normalizado que determine esta cantidad teniendo en cuenta las condiciones térmicas de cada día y de cada hora del día.

En el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya, en el marco de la realización de una Tesis Doctoral (1) y a través de dos convenios de colaboración con el Grupo Cementos Molins (17), se planteó realizar un estudio de tipo experimental en laboratorio y en condiciones reales de producción, con el objeto de determinar las causas de estas pérdidas de resistencia en el hormigón y al mismo tiempo, desarrollar una herramienta para la toma de decisiones a nivel industrial, que optimice la sobredosificación de cemento en el hormigón en verano.

En el desarrollo de esta herramienta hay que tener en cuenta que la misma debe ser viable técnica y económicamente, y que debe ser susceptible de implementación a nivel industrial en plantas de hormigón preparado, obteniéndose beneficios económicos debidos a la reducción de los costes de producción. Asimismo, al reducir los consumos de cemento, indirectamente se generan beneficios medioambientales reduciendo las emisiones de CO₂ a la atmósfera, teniendo al mismo tiempo beneficios sociales aportando valor añadido a los usuarios de estos hormigones (18).

El objetivo de la primera parte de este artículo es mostrar el planteamiento metodológico de este estudio, así como los principales resultados y conclusiones obtenidas, desde una perspectiva experimental. En la segunda parte del mismo se presentan las medidas concretas tomadas a nivel industrial, algunas de las cuales se muestran en (19).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Generalidades

La metodología de investigación empleada se fundamenta en dar solución a un problema de tipo industrial mediante un estudio científico experimental. Para ello se efectuaron diversas campañas experimentales en laboratorio, simulando en una cámara climática las condiciones reales de temperatura y humedad relativa. Esta metodología se aplicó al hormigón y a cada uno de sus constitu-

countries with Mediterranean climates (e.g. Spain) from early June to mid-September. Although this entails an overdose of a pre-established amount of cement, no standard criteria are in place that specify the amount depending on daily or hourly temperatures.

The Department of Construction Engineering at the Polytechnic University of Catalonia (UPC) studied such declines in concrete strength under both laboratory and concrete plant conditions with a view to developing an industrial procedure to optimize summertime cement overdosing. The research was conducted as part of a PhD thesis (1) in conjunction with Grupo Cements Molins (17), cement manufacturers.

The method sought had to be both technically and economically feasible, as well as readily implemented in ready-mixed concrete plants to reduce production costs. Moreover, by reducing cement use the procedure would indirectly lead to lower CO₂ emissions, thereby providing added value in the form of benefits for society at large (18).

This first part of the article discusses the methodological approach used in the study, along with the most relevant results and conclusions drawn from the experiments conducted. The specific industrial scale measures adopted are set out in (19).

2. EXPERIMENTAL

2.1. Summary

The approach adopted in this study consisted in using the results of scientific research to solve an industrial problem. The method involved several types of laboratory tests, in which real temperature and humidity were simulated in a climate-controlled chamber. Both concrete and its various components (i.e. aggregates, mortars, and cement pastes) were studied under a number of condi-

yentes (áridos, morteros y pastas de cemento), con el objeto de conocer experimentalmente el comportamiento de estos materiales ante diferentes condiciones térmicas y su efecto final sobre la trabajabilidad y la resistencia a compresión del hormigón (1).

Como resultado de estos procedimientos experimentales de caracterización, se determinó que la temperatura ambiental extrema tiene influencia sobre las propiedades térmicas, de trabajabilidad y mecánicas del hormigón, morteros, pastas de cemento y áridos (1).

2.2. Materiales estudiados

Para la realización de las campañas experimentales se utilizó cemento Portland CEM I 42,5 R y áridos calizos machacados de fracciones 12-20, 5-12, 0-5 y 0-2 mm. El aditivo químico empleado corresponde a un aditivo polifuncional en base a sulfonatos surfactantes. El diseño de la mezcla utilizada corresponde a un hormigón de fabricación comercial cuya resistencia nominal es de 25 MPa, con relación agua/cemento de 0,56. El asentamiento de diseño en el cono de Abrams para este hormigón era de 10 cm. Los morteros se fabricaron de acuerdo a la norma europea EN 196-1, utilizando arena normalizada. Las pastas de cemento fueron fabricadas manteniendo las mismas relaciones agua/cemento y aditivo polifuncional/cemento que en el caso del hormigón.

2.3. Condiciones climáticas

El estudio de las variables estudiadas se ha desarrollado en diferentes condiciones climáticas de temperatura ambiental y humedad relativa. En este caso se realizaron simulaciones climáticas (cíclicas y constantes) mediante una cámara climática programable. Para el caso de las condiciones climáticas cíclicas, se tomaron dos días históricamente extremos de Barcelona en función de un análisis en el tiempo de temperaturas máximas-verano (24 de agosto de 2000) y mínimas-invierno (23 de diciembre de 2001) en base a los registros del Observatorio Fabra (20). En la figura 1 (a y b) se muestran los perfiles térmicos ambientales de temperatura y humedad relativa para las condiciones de verano e invierno, respectivamente.

Para las condiciones de referencia se tomó una temperatura de 20 °C (constante) y una humedad relativa de aproximadamente 95% (constante). Para el caso de las temperaturas constantes éstas fueron de 38 °C, para reflejar las condiciones de verano, y, de 6 °C para reflejar las de invierno.

Con el objeto de simular en laboratorio estas condiciones climáticas, se utilizaron dos cámaras climáticas herméticas, la primera fue construida en las instalaciones de la

tions to evaluate the effects of such conditions on concrete workability and compressive strength (1).

The above procedures revealed that extreme temperatures influence the thermal behaviour and workability and mechanical properties of concrete, aggregates, mortars and cement pastes (1).

2.2. Materials studied

The laboratory tests were performed on Portland CEM I 42.5 R cement and crushed angular limestone aggregate with fraction groupings as follows: 0 to 2 mm, 0 to 5 mm, 5 to 12 mm, and 12 to 20 mm. A sulphonate surfactant-based polyfunctional chemical admixture was used. The mix was a commercially produced concrete with a nominal strength of 25 MPa, a water-cement ratio of 0.56 and a 10-cm slump. The mortars were prepared as specified in European standard EN196-1, using standard sand. The cement pastes were prepared using the same water-cement and admixture-cement ratios as in the concrete.

2.3. Temperature and humidity

The samples were studied under several combinations of temperature and relative humidity. Both cyclic and constant weather conditions were simulated in a programmable climate chamber. The cyclic conditions were based on two days of historically extreme summer (24 August 2000) and winter (23 December 2001) temperatures in Barcelona, according to Observatorio Fabra records (20). Figures 1 (a) and (b) show the temperature and humidity profiles for the summer and winter conditions used, respectively.

A third set of conditions, namely a constant temperature of 20 °C and a constant relative humidity of 95%, was defined for reference purposes. The constant temperatures for the summer and winter conditions were 38 °C and 6 °C, respectively.

Two air-tight chambers were used for the simulations: one built on site at a plant belonging to the Grupo Cements Molins subsidiary Promotora Mediterránea, S.A.

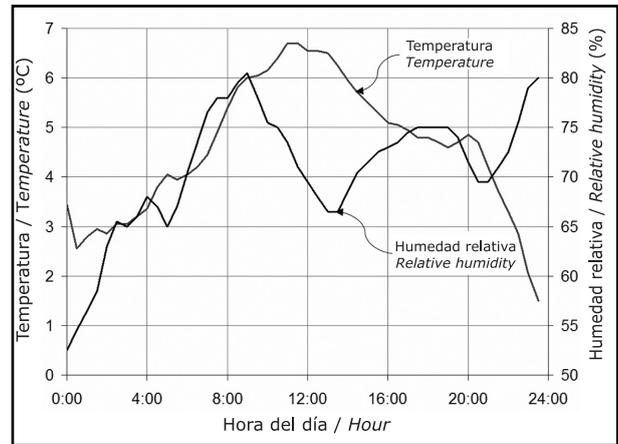
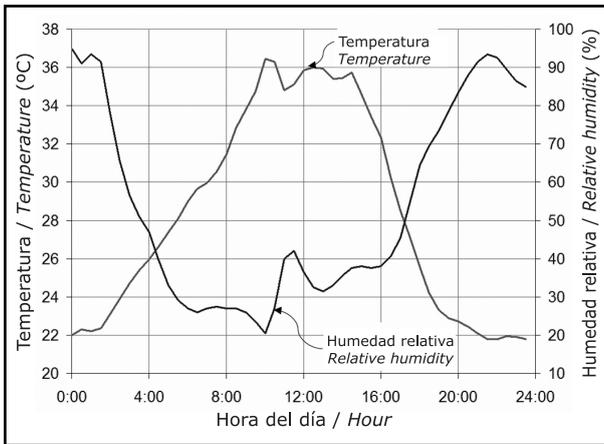


Figura 1. Perfiles térmicos ambientales. (a) Condiciones de verano, (b) Condiciones de invierno.
Figure 1. Temperature and relative humidity profiles for (a) summer and (b) winter conditions.

empresa Promotora Mediterránea, S.A. (PROMSA) del Grupo Cementos Molins y la segunda fue instalada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (LTE) de la UPC.

Dichas cámaras climáticas son capaces de ser programadas para reproducir las condiciones ambientales específicas en base a los registros, cada media hora, de temperatura y humedad relativa. Cabe mencionar que este estudio estuvo enfocado desde el principio a desarrollar aplicaciones industriales para optimizar la sobredosificación del cemento en el hormigón en climas cálidos; sin embargo, se eligieron temperaturas de invierno y de referencia con fines comparativos a nivel experimental.

2.4. Ensayos con hormigón

Estos ensayos se realizaron como un primer acercamiento al problema, experimentando directamente con hormigones sujetos a distintas condiciones climáticas. El objetivo de esta fase experimental fue la de estudiar la influencia de la temperatura ambiental y la hora de hormigonado en la trabajabilidad y resistencia a compresión del hormigón bajo distintas condiciones climáticas (referencia, verano e invierno). Asimismo, conocer la influencia de la edad de desmoldeo de las probetas de hormigón en la resistencia a compresión (21).

En estos ensayos se mantuvo siempre la misma dosificación con el objeto de observar las variaciones existentes de trabajabilidad y resistencia entre el hormigón control o de referencia y ambas condiciones climáticas, así como la variación resultante entre las dos condiciones climáticas de verano e invierno.

El control de la temperatura del hormigón se llevó a cabo mediante sondas termopares conectadas a un dispositivo de adquisición de datos térmicos "squirrel". Las horas de

(PROMSA) and the other installed at the UPC's Structural Technology Laboratory (LTE).

These chambers were programmed to reproduce environmental conditions based on half-hourly temperature and relative humidity readings. Inasmuch as this study was aimed at developing industrial applications to optimize cement overbatching in concrete in warm climates, the winter and reference temperature experiments were used for comparison.

2.4. Tests on concrete

A series of preliminary tests were conducted on concrete samples, after exposure to the conditions described in the previous section. The aim was to study the influence of temperature and concrete mixing hour on concrete workability and compressive strength under the different test conditions (reference, summer and winter). A second objective was to determine the existence or otherwise of a relationship between the demoulding age and concrete compressive strength (21).

The batching dosage was kept constant in all these tests to determine the variations in the workability and strength of the concrete samples cured under different conditions.

Concrete temperature was controlled via thermocouple wires connected to a squirrel data logger. Samples were demoulded after 24, 48 and 72 hours and then cured

desmoldeo fueron 24, 48 y 72 horas con curado posterior en condiciones normalizadas. Para cada amasada (efectuado a diferentes horas del día, 5 en total para cada edad de desmoldeo) se determinó la consistencia del hormigón mediante el ensayo del asentamiento (cono de Abrams) y se fabricaron 5 probetas que se ensayaron a 7 días (2 probetas) y a 28 días (3 probetas).

2.5. Ensayos con áridos

Tomando en consideración la gran importancia de los áridos en las prestaciones del hormigón, ya que éstos representan el constituyente con mayor proporción en el mismo, se determinó estudiar más a fondo este componente. El objetivo principal de esta fase experimental fue la de estudiar la influencia de la temperatura ambiental en las propiedades de los áridos y su influencia final sobre el comportamiento del hormigón, principalmente sobre la trabajabilidad, con el propósito de explicar la disminución de trabajabilidad registradas en la fase anterior tanto en condiciones climáticas de verano e invierno (7).

Las variables a estudiar fueron la velocidad de absorción y el rozamiento interno de los áridos finos (arenas), bajo diferentes condiciones térmicas de temperatura y humedad relativa.

Velocidad de absorción

Los coeficientes de absorción de los áridos finos fueron determinados con el fin de explicar una de las causas de las pérdidas de trabajabilidad del hormigón en verano; estas determinaciones se realizaron bajo las tres condiciones climáticas (referencia, verano e invierno) y bajo dos tiempos de saturación: 30 minutos y 24 horas. La norma de referencia para realizar este ensayo fue la ASTM C128-01.

Rozamiento interno

El rozamiento interno de los áridos se determinó con el fin de explicar una de las causas de las pérdidas de trabajabilidad del hormigón en invierno, las cuales se observaron en los resultados de la fase experimental con hormigón. Asimismo, el rozamiento interno se determinó en las arenas, con el objeto de verificar si había variaciones en su valor en función de la temperatura; los valores del ángulo de rozamiento interno se determinaron directa e indirectamente.

La forma de determinarlos directamente consistió en calcular el ángulo de reposo o talud natural de las arenas para las tres condiciones climáticas establecidas, debido a que era prácticamente imposible determinar los ángulos de rozamiento interno reales mediante el ensayo de

under standardized conditions. The concrete mixes were prepared and sampled at five different mixing hours (for each of the three demoulding ages) to determine the slump. Five cylindrical concrete specimens were made from each concrete mix; of these, two were tested at t=seven and three at t=28 days.

2.5. Tests on aggregates

As the primary component of concrete, aggregates are crucial to its performance. The objective at this stage was to study the influence of temperature on aggregate properties, including the ultimate consequences for concrete behaviour, i.e., workability. Specifically, an explanation was sought for the loss of workability observed in the samples exposed to summer and winter conditions (7).

The absorption rate and internal friction of fine aggregates (sand) were studied under the temperature and relative humidity conditions specified above.

Absorption rate

Absorption coefficients were calculated for the fine aggregates to ascertain whether a decline in absorption might be one of the causes of the observed loss of concrete workability in the summer. Experiments were conducted on the reference, summer and winter samples, at two saturation times: 30 minutes and 24 hours. The protocol followed in this experiment was as set out in ASTM standard C128-01.

Internal friction

Fine aggregate internal friction was found to ascertain whether this parameter might be involved in the observed loss of concrete workability in the winter, i.e., whether it varied with temperature. Internal friction angles were calculated both directly and indirectly.

Direct calculation consisted in finding the angle of natural repose of the sand under each of the three conditions studied, in light of the near impossibility of conducting the direct shear test (ASTM D3080-98) on the high and low temperature samples because the equipment needed

corte directo (norma ASTM D3080-98) a temperaturas altas y bajas, dado que no era posible trasladar el equipo a la cámara climática. El ensayo de corte directo se realizó para las arenas solamente en condiciones de referencia, que eran las condiciones presentes en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UPC.

La forma de determinarlos indirectamente fue a través de diferentes ensayos: compactación dinámica vibratoria, penetración de la sonda de Vicat y densidad compactada. Asimismo, para observar el efecto del contenido de humedad de la arena en la trabajabilidad del mortero, se fabricaron morteros con arena caliza 0-5 mm con diferentes contenidos de humedad y dos métodos de amasado en las tres condiciones climáticas estudiadas. Los detalles experimentales de todos estos ensayos pueden ser consultados en (1, 7).

2.6. Ensayos con morteros y pastas de cemento

El objetivo principal de esta fase experimental fue el de estudiar la influencia de la temperatura ambiental en las propiedades de trabajabilidad, mecánicas y microestructurales de morteros y pastas de cemento, con el fin de conocer el efecto de las condiciones térmicas en materiales cementantes de escala menor que el hormigón.

En el caso de los morteros se determinaron los perfiles térmicos, la trabajabilidad y la resistencia a compresión a 7 y 28 días. Para las pastas, igualmente se determinaron los perfiles térmicos y se realizaron estudios de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), estos últimos con el fin de conocer el efecto de las condiciones térmicas ambientales en el desarrollo de la microestructura de estas pastas de cemento, y verificar si se observaban los mismos efectos que en el caso del hormigón y del mortero. Los ensayos de caracterización de las pastas de cemento mediante Resonancia Magnética Nuclear y Microscopía Electrónica de Barrido, fueron realizados como parte integral de este proyecto, por lo tanto, en este artículo solo se mostrarán las tendencias principales y las conclusiones obtenidas en el informe correspondiente (17).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Ensayos con hormigón

Resultados térmicos

En la Figura 2 (a) se presenta la evolución de la temperatura del hormigón para cada una de las horas de fabricación, junto con el registro de la temperatura ambiental. Por otro lado, la figura 2 (b) muestra la relación de la

could not be installed in the chamber. Consequently, the direct shear test was conducted on the sand under the reference conditions only, i.e., in the UPC Soil Mechanics Laboratory.

The indirect method involved a battery of tests: dynamic vibration compacting, Vicat needle penetration and compacting density. Mortars were prepared with (0 to 5-mm) sand having different moisture contents to determine the effects of sand moisture on mortar workability. Two mixing methods were used to prepare the samples under the three types of conditions. The experimental details for all the above tests are listed in (1, 7).

2.6. Tests on mortars and cement pastes

The aim of these tests was to determine the influence of temperature on the workability and mechanical and microstructural properties of mortars and cement pastes and therefore on cement materials at the sub-concrete scale.

Seven- and 28-day temperature profiles, workability and compressive strength were established for mortars. Similarly, temperature profiles were found for the cement pastes. Nuclear magnetic resonance (NMR) and scanning electron microscopy (SEM) techniques were also used to evaluate the effects of weather conditions on paste microstructural development and ascertain whether the effects found in the concrete and mortar could be observed in the pastes as well. Since the NMR and SEM studies were conducted as part of a broader project, only the major trends and the primary conclusions based thereon are reported in this article and in the corresponding reference (17).

3. EXPERIMENTAL RESULTS

3.1. Tests on concrete

Thermal behaviour

Figure 2 (a) shows the concrete temperature profiles for each concrete mixing hour, together with the temperature. The relationship between variations in temperature

variación térmica ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$) y el tiempo de reacción ($\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$).

($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$) and reaction time ($\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$) is shown in Figure 2 (b).

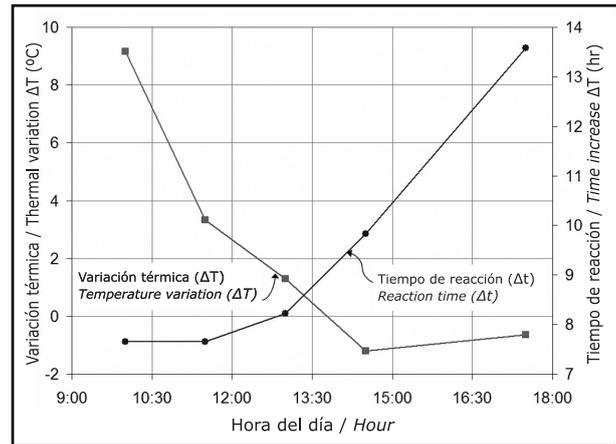
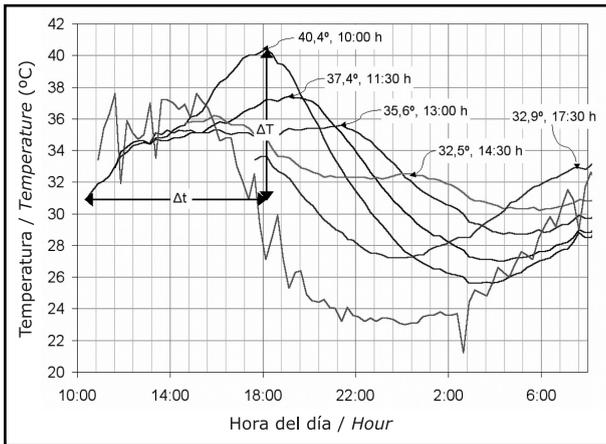


Figura 2. Resultados térmicos del hormigón. (a) Perfiles térmicos, (b) Variación térmica y tiempo de reacción.

Figure 2. Concrete (a) temperature profiles, and (b) variations in temperature and reaction time.

Observando los resultados obtenidos se puede señalar que el tiempo de reacción (Δt) transcurrido entre el momento de la temperatura inicial (T_i) y el momento de máxima temperatura (T_{\max}) es mayor en las últimas amasadas (horas) del día, e igualmente este tiempo es menor en las primeras horas del día. De esta forma, cuando las variaciones de temperatura (ΔT), debidas a la temperatura ambiente y a las reacciones exotérmicas del cemento en el hormigón, son en el mismo sentido (pendiente positiva), la cinética es más rápida y consecuentemente los tiempos de reacción (Δt) son menores. Igualmente, se puede ver que la variación térmica (ΔT) entre la temperatura inicial (T_i) y la temperatura máxima (T_{\max}) debida a las reacciones exotérmicas, disminuye en las últimas horas del día y viceversa. Estas menores variaciones de temperatura tienen efectos positivos desde el punto de vista de la resistencia mecánica, como se verá posteriormente.

Los aspectos anteriormente señalados pueden explicarse de la siguiente manera. Un incremento en la temperatura de curado acelera las reacciones químicas de hidratación y la exposición del hormigón a una elevada temperatura durante y después del contacto inicial del cemento con el agua, reduce la duración del período durmiente y esto ocasiona que toda la estructura de la pasta de cemento hidratado se constituya muy prematuramente (6). Podemos mencionar aquí un axioma de la química física que dice: la velocidad de reacción se duplica si la temperatura bajo la cual el proceso se lleva a cabo se incrementa en 10 °C (22).

As these graphs show, the variation in reaction time (Δt) between the initial (T_i) and final temperatures (T_{\max}) was greatest for the concrete mixes prepared at the end of the day, and smallest for the mixes prepared early in the day. Therefore, when temperature variations (ΔT) due to outdoor temperatures on the one hand and cement exothermal reactions on the other bore the same sign (positive slope), reaction kinetics were faster and reaction times shorter (Δt). Similarly, the variation (ΔT) between the initial (T_i) and final temperatures (T_{\max}) due to exothermal reactions was smallest at the end of the day, and greatest in the mixes prepared early in the day. As discussed below, these minor variations in temperature have positive effects on mechanical strength.

The explanation for the above observations lies in two developments. Firstly, increases in curing temperature accelerate the hydration reactions. Secondly, exposing concrete to high temperatures during and after the initial contact between the cement and water shortens the dormant period, causing the entire structure of the hydrated cement paste to form prematurely (6). This is consistent with a well-known axiom of physical chemistry, according to which reaction rates double for every 10 °C rise in temperature (22).

Resultados mecánicos y de trabajabilidad

La Figura 3 muestra los resultados de resistencia a compresión a los 28 días, así como los valores de asentamiento de los hormigones fabricados bajo condiciones de verano e invierno, para cada una de las horas de fabricación. En esta gráfica se presentan los resultados de resistencia con sus dispersiones y un ajuste lineal, asimismo los resultados de asentamiento están marcados por círculos vacíos y también están ajustados linealmente. Por otro lado, con el objeto de visualizar la dispersión interna de cada serie de hormigonado, se realizó la determinación de la varianza poblacional a través de la media ponderada de todas las varianzas de las muestras.

Mechanical properties and workability

Figure 3 shows the results for 28-day compressive strength and the slump values for mixes prepared at different mixing hours under summer and winter conditions. Strength is graphed along with the respective dispersion values. Both strength and workability, which is shown in open circles, were fitted by linear regression. In addition, the internal dispersion for each data series was found by determining the single population variance from the pondered mean of all the sample variances of all the samples.

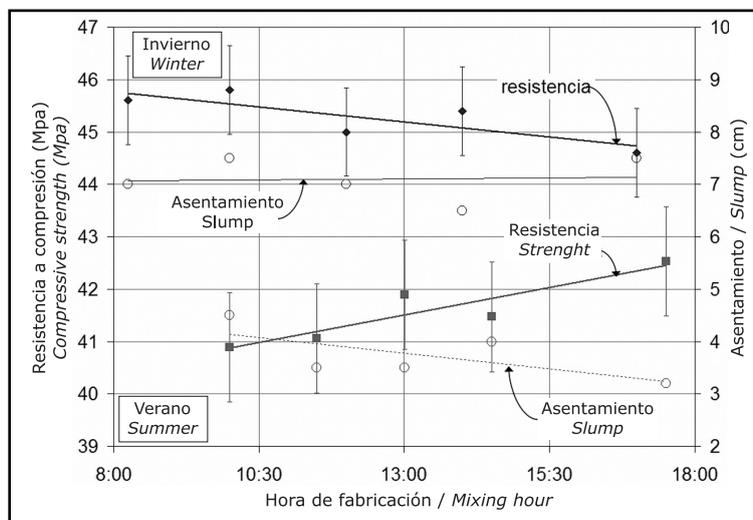


Figura 3. Resistencia a compresión del hormigón a 28 días y asentamiento.

Figure 3. 28-day concrete compressive strength and workability.

En los resultados, podemos ver que la magnitud de los valores de resistencia a compresión es mayor en invierno que en verano, teniendo como punto intermedio el hormigón de referencia (43,3 MPa). También se observan las tendencias crecientes y decrecientes en la resistencia a compresión, para las condiciones de verano y de invierno, respectivamente.

Por otro lado, se constata la influencia de la temperatura ambiental en la trabajabilidad del hormigón fresco, teniendo la situación más desfavorable para las condiciones de verano, en las cuales los valores del asentamiento son muy bajos. Para el caso de las condiciones de invierno, los valores del asentamiento son algo mayores, pero en ningún caso, dichos valores son similares al obtenido en el hormigón de referencia (9 cm). El asentamiento, en este caso, no tiene influencia sobre la resistencia.

Note that the strength values were greater for the summer than for the winter concretes and that the reference concrete stood at mid-range (43.3 MPa). The strength gain and loss in summer and winter, respectively, are also visible on the graph.

Temperature was indeed shown to influence fresh concrete workability, with the most drastic effects observed in the summer samples, whose slump values were very low. While the winter concrete exhibited slightly higher values, both winter and summer samples had substantially smaller slumps than the reference concrete (9 cm). Slump size was unrelated to strength in this case.

Los fenómenos observados en esta serie experimental, pueden ser sintetizados de la siguiente manera. Una formación rápida y no uniforme de los productos de hidratación, como consecuencia de un curado a temperaturas superiores a la ambiente, genera una disposición espacial "más desordenada" de dichos productos lo que a su vez produce un desarrollo microestructural más heterogéneo y menos compacto (sistema poroso menos refinado) que se refleja en un menor aumento de resistencias mecánicas a lo largo del tiempo (1, 21). Esta estructura puede responder a cristales más pequeños que no impliquen una buena reticulación espacial en el tiempo, con la consiguiente repercusión estructural.

3.2. Ensayos con áridos

Velocidad de absorción

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de velocidad de absorción, para las dos arenas y para tiempos de saturación de 30 minutos y 24 horas.

The explanation for the above observations can be summarized as follows. As a result of curing at higher temperatures, hydration products form more rapidly and non-uniformly, yielding a less orderly structure with more heterogeneous and less compact microstructural development and, ultimately, smaller increases in mechanical strength over time (1, 21). The smaller crystals that very likely constitute such structures would be unable to ensure effective spatial networking over time, with the concomitant impact on strength.

3.2. Tests on aggregates

Absorption rate

The results of the absorption rate tests for the two sands at saturation times of 30 minutes and 24 hours are shown in Figure 4.

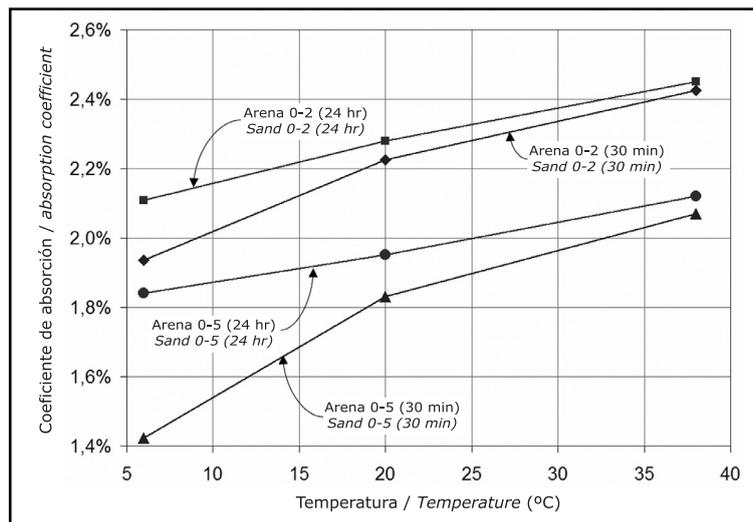


Figura 4. Resultados de velocidad de absorción.

Figure 4. Results of absorption rate testing.

Puede observarse que los coeficientes de absorción a 30 minutos y a 24 horas presentan las mismas tendencias de comportamiento en función de la temperatura ambiental a la cual fueron puestas en climatización y en saturación. De igual forma, las pendientes que presentan ambas gráficas de 6 °C a 20 °C y de 20 °C a 38 °C son casi las mismas en función de la clasificación granulométrica del árido.

Por otro lado, en condiciones de mayor temperatura los coeficientes de absorción tienen un incremento muy rápido en los primeros 30 minutos, sin embargo, posteriormente la tasa de absorción es prácticamente nula, sien-

Note that the 30-minute and 24-hour absorption coefficients exhibited the same behaviour patterns with variations in temperature. Moreover, the slopes of their temperature - aggregate grain size curves were nearly identical in the two temperature intervals, 6-20 °C and 20-38 °C .

At high temperatures, the absorption coefficients rose rapidly in the first 30 minutes, but then flattened. And in fact, at temperatures of 38 °C, the difference in absorption at saturation times of 30 minutes and 24 hours was

do mínima la diferencia de absorción con saturación de 30 minutos y 24 horas para 38 °C. Esto representa que el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos, esto es, durante el amasado del hormigón (1, 7). Lo anterior indica que la absorción de los áridos es un factor de gran importancia para la trabajabilidad del hormigón, sobre todo en condiciones de altas temperaturas (verano).

Rozamiento interno

A continuación se muestran en la tabla 1 los valores de los ángulos de reposo obtenidos para todas las condiciones climáticas estudiadas, con el objeto de estimar el rozamiento interno de los áridos directamente. Los valores de los ángulos de rozamiento interno obtenidos de acuerdo a la norma ASTM D3080-98, son los siguientes: 42,2° para la arena 0-5 mm y 46,0° para la arena 0-2 mm (bajo condiciones de referencia).

nearly nil, an indication that the bulk of absorption occurred within minutes, essentially during concrete mixing (1, 7). Aggregate absorption is therefore a major factor in concrete workability, particularly at high temperatures (i.e., in the summer).

Internal friction

The angle of natural repose was determined for samples prepared under different conditions as a direct measure of aggregate internal friction. The results are given in Table 1. The values of the internal friction angles obtained with the procedure set out in ASTM D3080-98 were 46.0° for 0-2-mm sand and 42.2° for the 0-5-mm sand, under the reference conditions.

Tabla 1 / Table 1
 Valores obtenidos de los ángulos de reposo.
Angle of natural repose

Condición climática Weather condition	Invierno / Winter (6°C)	Referencia / Reference (20°C)	Verano / Summer (38°C)
Arena / sand 0-5 mm	32,7°	32,4°	31,0°
Arena / sand 0-2 mm	36,6°	36,4°	34,8°

Los valores de los ángulos de reposo son decrecientes en ambas arenas en función de la temperatura, siendo los valores de la arena 0-2 siempre mayores. Los comportamientos aquí observados son muy suaves, sin embargo, desde un punto de vista de tendencias, estos resultados confirman lo que se mencionó anteriormente, en el sentido de que los ángulos de fricción interna son en cierto modo, dependientes de la temperatura (7).

For both sands, the angle of natural repose declined with rising temperatures, although larger angles were recorded for the 0-2-mm sand at all temperatures. While the differences in this regard were fairly small, the trends confirmed the above assumption that friction angles are temperature-dependent to some extent (7).

En relación a los valores de ángulo de rozamiento interno obtenidos del ensayo de corte directo, se puede ver que éstos son mucho más grandes que los ángulos de reposo. Este hecho está relacionado con el efecto de la dilatancia y el grado de empaquetamiento de los áridos, ya que el esfuerzo cortante de la arena seca depende de varios factores, tales como la composición mineralógica de los áridos, tamaño, forma, textura superficial y graduación (23).

The internal friction angles found with the direct shear test were much larger than the angle of natural repose values listed in Table 1. This finding is related to dilatancy and the degree to which the aggregate was packed, for dry sand shear stress depends on several factors, including the mineralogical composition of the aggregate, size, form, surface texture and grading (23).

La dilatancia también depende de la angularidad del material, el confinamiento (esfuerzo normal en corte directo) y la densidad, aumentando si el material presenta mayor angularidad y mayor densidad, y disminuyendo si se incrementa el esfuerzo normal (24).

Dilatancy, which also depends on angularity, confinement (normal stress under direct shear) and density, increases with angularity and density, but decreases with increasing normal stress (24).

Las figuras 5 (a, b, c y d) muestran los resultados obtenidos para la determinación indirecta del rozamiento interno de los áridos, por medio de los ensayos de compactación dinámica vibratoria (hasta un tiempo de 50 segundos), la penetración de la sonda de Vicat, la densidad compactada y consistencia del mortero (bajo los dos métodos de amasado), respectivamente, y para las tres condiciones climáticas estudiadas.

Figures 5 (a, b, c and d) show aggregate internal friction as found indirectly from dynamic vibration compacting (for up to 50 seconds), Vicat probe penetration, compacted density, and fresh mortar consistency for the three temperature conditions studied.

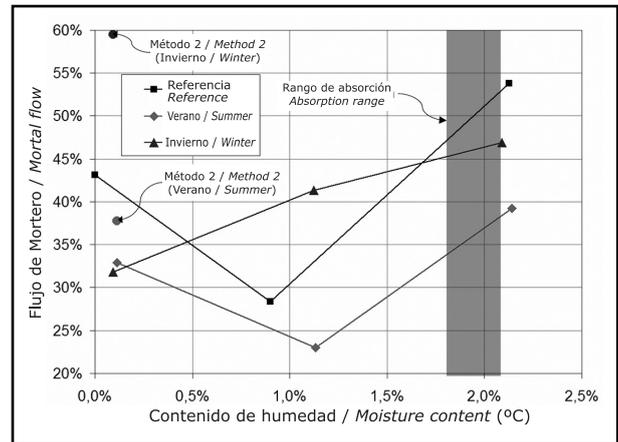
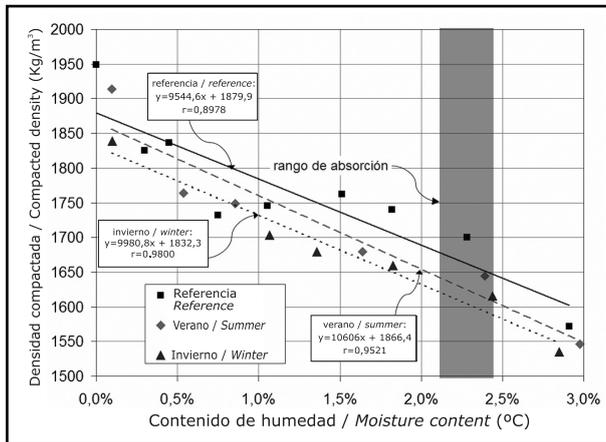
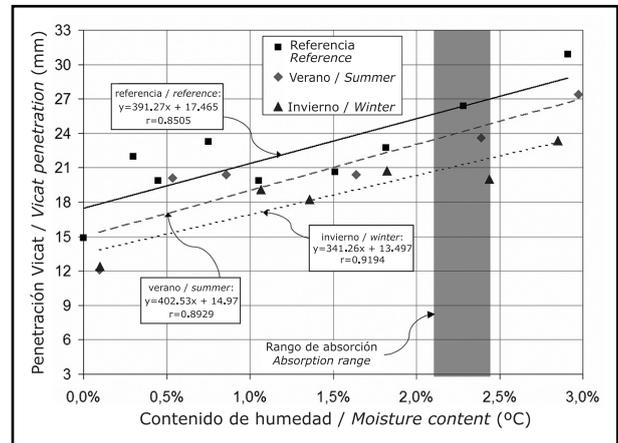
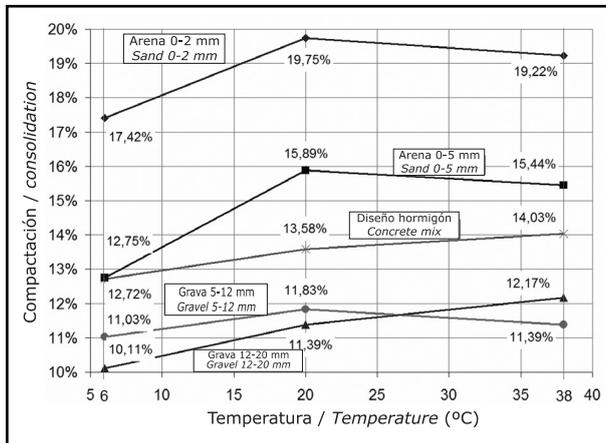


Figura 5. Resultados del rozamiento interno de los áridos (indirectamente). (a) Compactación dinámica vibratoria (t=50s), (b) Penetración de sonda de Vicat (c) Densidad compactada, (d) Consistencia del mortero (2 métodos).
 Figure 5. Indirect determination of aggregate internal friction: (a) dynamic vibration compacting (t = 50 s), (b) Vicat needle penetration (c) compacted density and (d) fresh mortar consistency (two methods).

Los comportamientos observados en estos resultados reflejan la influencia de la humedad y la temperatura en el ángulo de rozamiento interno de los áridos. Así, el ángulo de rozamiento interno aumenta con la humedad hasta un máximo, superado el cual, dicho ángulo disminuye al existir un efecto de lubricación entre los áridos. Si existe exceso de agua se produce una segregación del árido, manteniendo prácticamente constante el ángulo de rozamiento interno. Las consecuencias sobre el flujo en el mortero son de signo contrario, por lo que explica que a

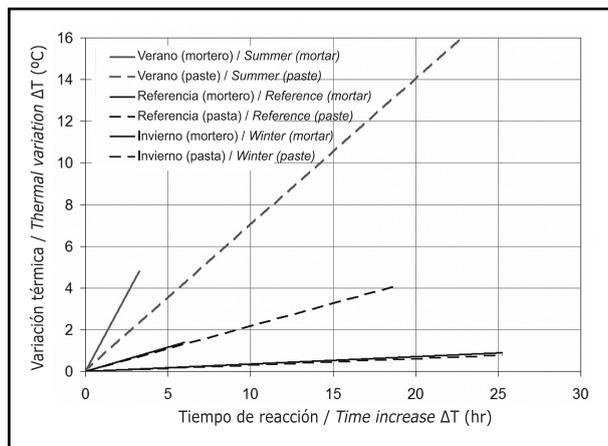
As the graphs show, temperature and moisture content affected the internal friction angle of the aggregates. The angle proved to be inversely proportional to temperature, with flow increasing with that parameter. This would explain the lesser flow in dry aggregate in winter. At the same time, the angle was found to be directly proportional to moisture content, up to a certain value. Beyond that value, the angle declined due to the lubricating effect existing in aggregate. In the presence of excess water, the aggregate segregated, while the angle of

mayor ángulo de rozamiento interno la extensión del flujo sea menor.

Por otro lado, tal como se ha visto, el ángulo de rozamiento disminuye a medida que aumenta la temperatura, y, consecuentemente, al contrario el flujo aumenta con la temperatura. Ello explica que para las condiciones de invierno, con el árido seco, el porcentaje de flujo obtenido sea menor. Estos mismos comportamientos se observan en el 'Método 2' de amasado (en el cual se añade parte del agua junto con la arena en el inicio del mezclado y el resto del agua casi al final del proceso, después de haber añadido el cemento), en el que, por un lado, el flujo en invierno es menor y, por otro, el aportar agua de forma previa a los áridos por encima del punto de saturación disminuye el ángulo de rozamiento interno y, consecuentemente, aumenta el flujo (1, 7).

3.3. Ensayos con morteros y pastas de cemento

A manera de resumen, en la figura 6 (a) se muestran los resultados térmicos obtenidos para los morteros y las pastas bajo todas las condiciones climáticas. En dicha figura se relacionan los valores obtenidos de la variación térmica ($\Delta T = T_{max} - T_i$) y del tiempo de reacción (Δt). Por otro lado, los resultados de consistencia obtenidos mediante el ensayo de la mesa de sacudidas y los resultados a compresión a 28 días de los morteros fabricados se presentan conjuntamente a continuación en la figura 6 (b) para todas las condiciones climáticas estudiadas.



internal friction remained constant. Finally, flow declined as the angle grew.

The above trends were observed in mortars mixed using Method 2, in which part of the water was initially added with the sand alone and the rest at the end, after the cement was batched. Mixes prepared with this method exhibited high flow because adding water to the aggregates lowered the angle of internal friction; nonetheless, lower flows were recorded in simulated winter weather (1, 7).

3.3. Tests on mortars and cement pastes

Figure 6 (a) relates temperature variations ($\Delta T = T_{max} - T_i$) to reaction time (Δt) in mortars and cement pastes for all the conditions tested. Figure 6 (b) shows the flow table test results along with the 28-day compressive strength for the mortars prepared under all three conditions studied.

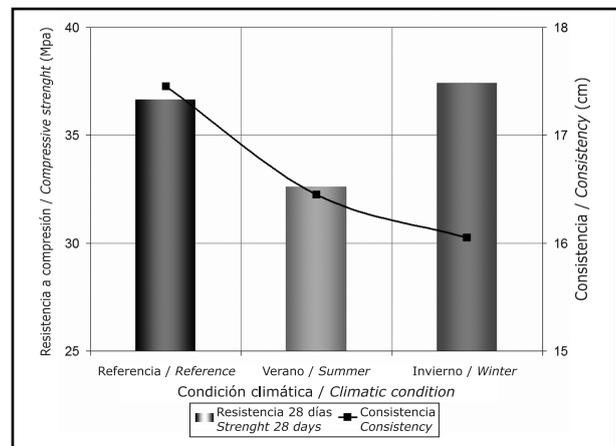


Figura 6. Resultados obtenidos para morteros y pastas. (a) Variación térmica y tiempo de reacción, (b) Resistencia a compresión y consistencia.

Figure 6. Mortar and cement paste. (a) variations in temperature vs reaction time and (b) compressive strength vs consistency.

Puede verse que los valores resultantes del incremento térmico y del tiempo de reacción tienen relación directa, y corresponden de manera general, con los resultados obtenidos con el hormigón, en el sentido de que los

Note that variations in temperature were directly proportional to reaction time. As a rule, the results were analogous to the findings for concrete: the higher the temperature, the greater the thermal variation (ΔT) and the

incrementos térmicos (ΔT) son mayores cuando mayor es la temperatura, y los tiempos de reacción (Δt) son menores cuando mayor es la temperatura también. En el caso de verano el comportamiento contradictorio que se observa puede responder a que la sonda se colocó cuando la tendencia de la temperatura ambiental era descendente. Este hecho sumado al efecto de retardador del aditivo, pueden justificar el retraso del tiempo en el que se alcanza las temperaturas máximas, respecto a las otras condiciones ambientales.

Asimismo, se observa una disminución de la trabajabilidad del mortero en ambos ciclos (verano e invierno). Si en el ciclo de verano la reducción puede ser explicada por una mayor demanda de agua por parte de los áridos y, una evaporación acelerada por el efecto de la temperatura; en el ciclo de invierno, ésta puede ser debida a la variación de algunas de las propiedades físicas del agua con la temperatura (densidad, viscosidad y tensión superficial) así como a la expansión o contracción de la estructura porosa de los áridos y su relación con la capacidad de absorción de agua (25, 26).

Los estudios realizados mediante RMN y SEM en pastas de cemento sometidas a diferentes condiciones climáticas, ponen de manifiesto que dichas condiciones extremas influyen en el desarrollo microestructural y en la formación del gel C-S-H, principal producto de hidratación responsable del desarrollo de resistencias, especialmente en las edades más tempranas; las tendencias observadas van en línea con los resultados obtenidos anteriormente para hormigón (1, 17).

4. CONCLUSIONES

Las prestaciones del hormigón que son afectadas por los factores climatológicos son principalmente, la trabajabilidad y la resistencia a compresión.

Las condiciones climáticas actúan directamente sobre los procesos de hidratación, fraguado, endurecimiento y desarrollo de resistencia del hormigón. En este sentido se puede verificar que la temperatura bajo la cual se llevan a cabo estos procesos, es un factor de influencia en el desarrollo de la microestructura del hormigón mediante la aceleración de estos procesos.

Por otro lado, a la luz de los resultados obtenidos en toda la investigación, se observa que el árido es uno de los factores más importantes, no sólo por las características específicas de su comportamiento con la temperatura, sino también porque es el componente, porcentualmente, más elevado del hormigón.

shorter the reaction time (Δt). A possible explanation for the contradictory behaviour observed in the summer samples is that the probe was installed as the temperature was falling. This, in combination with the retardation induced by the admixture, may have caused peak temperatures to shift to later times in these compared to the winter and reference samples.

The summer and winter samples exhibited lower workability than the reference mortars and pastes. Under summer conditions, the difference may be attributed to greater water demand on the part of the aggregate and speedier evaporation due to the higher temperatures. In the winter samples, the explanation is to be sought in the changes taking place in certain physical properties (density, viscosity and surface tension) of the water due to lower temperatures, along with the relationship between expansion/contraction of aggregate pores and water absorbability (25, 26).

The NMR and SEM studies conducted on the cement pastes showed that extreme, in particular extremely high, temperatures affect paste microstructure and the formation of CSH gel, the primary hydration product and the substance that affords strength to cement-based materials their strength. These findings are consistent with the concrete test results (1, 17).

4. CONCLUSIONS

The concrete parameters most affected by weather conditions are workability and compressive strength.

Such conditions have a direct impact on cement hydration, setting, hardening and strength development. The temperature at which these processes occur affects concrete microstructure.

The present study also revealed that aggregates are among the most important factors in concrete performance, due not only to their temperature-dependent behaviour, but also because they are the major component of concrete.

De los resultados y tendencias observadas en los ensayos experimentales, se puede deducir que la trabajabilidad y la resistencia del hormigón están influenciadas por las propiedades de los áridos, las cuales son susceptibles de variaciones en función de la temperatura. En este sentido, la temperatura actúa sobre la velocidad de absorción y el rozamiento interno de los áridos, mientras que en el hormigón tiene un efecto sobre su prestación (estado fresco y endurecido) y sobre el coste final (consumo de cemento). Estas relaciones se visualizan en la figura 7. Las asociaciones anteriormente ilustradas son significativas en términos de sus potenciales aplicaciones a escala industrial en la producción de hormigón preparado, debido a que las características del hormigón son dependientes de las propiedades de los áridos y éstas son altamente influenciadas por las condiciones ambientales.

Con el propósito de reducir costes, el consumo de cemento en el hormigón puede optimizarse en función de variables dependientes de la temperatura, sin detrimento en las prestaciones del hormigón en estado fresco y endurecido. La forma de actuar frente a este problema consiste básicamente en lograr que el comportamiento del hormigón en verano sea el mismo que en primavera y otoño, lo anterior se puede llevar a cabo mediante actuaciones a escala industrial, principalmente sobre la dosificación de cemento y sobre los áridos (Ver parte II de este artículo).

In this study, concrete workability and strength were found to be affected by aggregate properties, which are temperature dependent. Temperature also governs the absorption rate and internal friction in aggregates. Similarly, temperature affects the performance of both fresh and hardened concrete and may lead to greater cement consumption and higher final costs. All these relationships, illustrated in Figure 7, have significant implications for the industrial production of ready mixed concrete.

Cement consumption can be optimized by adjusting temperature-dependent parameters to reduce costs without forfeiting fresh or hardened concrete performance. This can be accomplished by designing concrete to behave in summer as it does in spring and autumn by optimizing cement and aggregate dosage. (See Part II of this article).

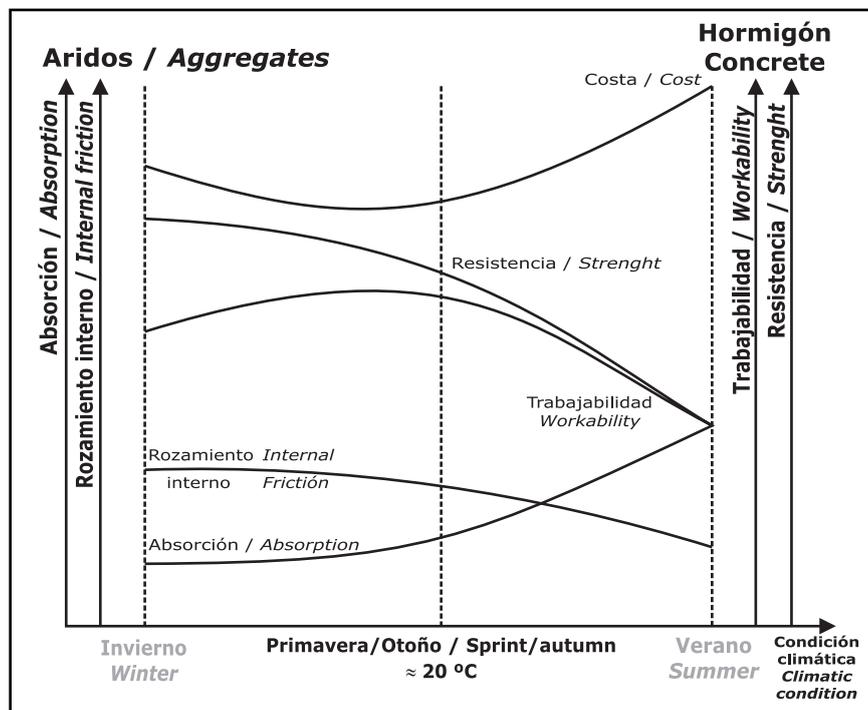


Figura 7. Relaciones entre el comportamiento de los áridos y el del hormigón.
Figure 7. Relationships between aggregate effects and concrete performance.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Grupo Cementos Molins por la financiación de este proyecto a través de los convenios de colaboración C-4669 y C-5737, especialmente a D. Domènec Masó y a D. Juan Puig. Asimismo al personal técnico del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universitat Politècnica de Catalunya. Igualmente, el primer autor desea agradecer el apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Grupo Cementos Molins, and particularly Drs Domènec Masó and Juan Puig, for the funding provided for this research under projects C-4669 and C-5737. The technical staff of the UPC Structural Technology Laboratory is also gratefully acknowledged. The first author received funding for this study from Mexico's National Science and Technology Council (CONACyT).

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Ortiz, J. : "Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado". *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (2005).
- (2) Comella, J., Picó, S., Taure, E.: "Las pérdidas de resistencia del hormigón durante el verano". *Anales de Construcciones y Materiales Avanzados*, Vol. 1 (2002), pp. 49-58, Ed. UPC, Barcelona, España.
- (3) Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., Gettu, R., García, T.: "Influencia de las altas temperaturas en el comportamiento del hormigón: simulación de las condiciones de verano". *Memorias del VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la Construcción (CONPAT 2003)*, Yucatán, México (2003).
- (4) Mouret, M., Bascoul, A., Escadeillas, G.: "Drops in concrete strength in summer related to the aggregate temperature". *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, nº 3 (1997), pp. 345-357. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00038-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00038-0)
- (5) Soroka, I.: *Concrete in Hot Environments*, Ed. E & FN Spon, London (1993).
- (6) Neville, A. M.: *Properties of Concrete* (fourth edition), Pearson Education Limited, London (1999).
- (7) Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., García, T.: "Influence of environmental temperatures and moisture of aggregates on the workability of cement mortar", artículo remitido a *Construction and Building Materials* (2005).
- (8) Dilek, U., Leming, M. L.: "Relationship between particle shape and void content of fine aggregate". *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 26, nº 1 (2004), pp. 14-20.
- (9) Fernández-Canovas, M.: *Hormigón* (cuarta edición), Colegio de Ingenieros Caminos Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones, Madrid (1996).
- (10) Malisch, W.: "Hot weather concreting tips". *Concrete Construction*, Vol. 35, nº 6 (1990), pp. 541-544.
- (11) Kay, T., Slater, D.: "Specifying concrete for adverse weather". *Concrete*, Vol. 29, nº 3 (1995), pp. 21-23.
- (12) Calmon, J. L.: "Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción". *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (1995).
- (13) Beaver, W.: "Liquid nitrogen for concrete cooling". *Concrete International*, Vol. 26, nº 9 (2004), pp. 93-95.
- (14) Lee, M.: "Economic cooling of hot weather concrete", *Concrete Construction*, Vol. 34, nº 9 (1989), pp. 791-796.
- (15) Gajda, J., Vangeem, M.: "Controlling temperatures in mass concrete". *Concrete International*, Vol. 24, nº 1 (2002), pp. 58-62.
- (16) O'Donnell, J. J., O'Brien, E. J.: "A new methodology for determining thermal properties and modelling temperature development in hydrating concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 17, nº 3 (2003), pp. 189-202. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00099-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00099-5)
- (17) UPC, CMI, PROMSA: "Conjunto de trabajos realizados en el marco del convenio". *Informe Conjunto Final*, Convenio C-4669 Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (2002).
- (18) Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., García, T.: "Performance improving application for ready mix concrete in hot weather environments". *Memorias Electrónicas del Congreso Materials & Mechanics 2005 - American Society of Civil Engineers*, Baton Rouge, Louisiana, Estados Unidos, (2005).
- (19) Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., García, T.: "Ready mix concrete optimization for hot weather climates". *Memorias del 2nd International FIB Congress (Fédération Internationale du Béton)*, ID 13-39, Nápoles, Italia (2005).
- (20) www.meteocat.com, Servei Meteorològic de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya.
- (21) Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., García, T.: "Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: simulation of hot and cold weather conditions". *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, nº 10 (2005), pp. (1970-1979). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.01.004>
- (22) Rastrup, E.: "Heat of hydration in concrete". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 6, nº 17 (1954), pp. 79-92.
- (23) Wood, D. M. . *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press, Reino Unido (1990).
- (24) Assaad, A., Masad, E.: "Analysis of factors influencing the shear deformation of granular materials". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, nº 5 (2004), pp. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ11062>
- (25) Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., García, T.: "Estudio de la influencia de la temperatura ambiental en la trabajabilidad y resistencia del hormigón". *Actas VIII Congreso Nacional Materiales - Valencia 2004*, pp. 17-24, Ed. Universidad Politècnica de Valencia, Valencia, España (2004).
- (26) Menéndez, G., Bonavetti, V. L., Irassar E. F. "Ternary blended cement concrete. Part I: early age properties and mechanical strength". *Mater. Construcc.* vol. 56 (284) (2006), pp. 55-67.

* * *